

Avaruussää ja sen vaikutuksia yhteiskuntaan

Esa-matti Pelkonen
LUK-tutkielma
Fysiikan tutkinto-ohjelma
Luonnontieteellinen tiedekunta
Oulun yliopisto
Toukokuu 2021

Sisältö

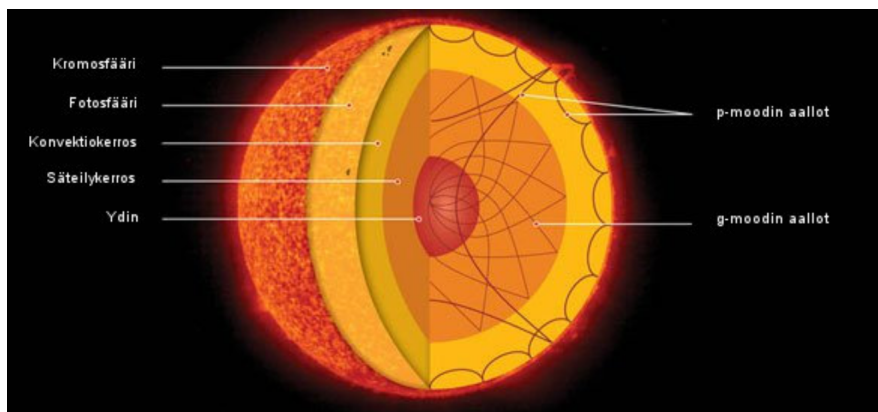
1	Johdanto	3
2	Aurinkotuuli	4
3	Koronan aukot	5
4	Auringonpilkut	6
5	Koronan massapurkaukset(CME)	6
6	Fläarit	7
7	Magnetosfääri	7
8	Magnetosfäärin aktiivisuus	9
8.1	Rengasvirta ja säteilyvyöt	9
8.2	Myrskyt ja alimyrskyt	11
8.3	Revontulet	11
9	Yhteiskunnallisia vaikutuksia	13
9.1	Geomagneettisesti indusoituneet virrat	13
9.2	Radio- ja GPS-signaalit	14
9.3	Vaikutus satelliiteille	15
9.4	Vaikutus astronautteihin	16
9.5	Revontulimatkailu	16
10	Yhteenveto	17
11	Lähteet	18

1 Johdanto

Iltataivaalla loistavat revontulet ovat luonnonihme, jonka meistä jokainen on nähnyt. Se on yksi yleisimmistä avaruussään ilmiöistä. Tämän lisäksi se aiheuttaa sähkövirtoja maanpinnalle sekä GPS- ja radiosignaalien häiriöitä. Avaruussää on siis avaruudessa tapahtuvaa jatkuvaa olosuhteiden muutosta. Siihen liittyvä käsite aurinkotuuli vaikuttaa voimakkaasti varsinkin Maan lähiavaruudessa tapahtuviin muutoksiin, joihin tässä kandintyössä keskitytään. Aurinkotuuli on Auringosta jatkuvasti sekä erilaisten purkausten kautta lähtevää plasmaa. Osuessaan Maan magnetosfääriin plasma muokkaa sitä ja aiheuttaa geomagneettisia myrskyjä. Tämän lisäksi kosminen säteily vaikuttaa omalta osaltaan maapallon lähiavaruuteen, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä.

2 Aurinkotuuli

Auringon ytimessä tapahtuvien ydinreaktioiden vapauttama energia kulkeutuu ytimen ulkopuolelle säteilyvyöhykkeelle fotoneina. Tämä johtuu siitä, että fotonien emissiotodennäköisyys ytimessä on suurempi ulospäin kuin sisäänpäin. Saavuttuaan säteilyvyöhykkeen ”rajalle”, 0,7 Auringon säteen etäisyydelle, energia alkaa kulkeutua ulospäin konvektion avulla. Tätä aluetta kutsutaan konvektiokerrokseksi. Sen lämpötila on matalampi, kuin sitä alempien kerrosten jolloin elektronit ja ytimet alkavat muodostaa atomeja. Konvektiokerroksesta nouseva kuuma kaasu nousee Auringon alimpaan ilmakehän osaan fotosfääriin. Se on Auringon näkyvän valon kerros. Fotosfäärin yläpuolella on kromosfääri, jossa lämpötila kasvaa voimakkaasti etäisyyden kasvaessa. Se aiheuttaa kaasun tiheyden laskemisen, mutta samalla kaasun ionisaatioaste kasvaa. Tällöin saavuttaessa Auringon uloimmalle kerrokselle koronalle, kaasu on saavuttanut lähes täysin ionisoituneen tilan eli siitä on tullut plasmää. Avaruussää saa alkunsa, kun tämä ionisoitunut kaasu purkautuu avaruuteen jolloin sitä kutsutaan aurinkotuuleksi. Se on siis jatkuvaa Auringon uloimmasta kerroksesta koronasta lähtevää hiukkasvirtaa. Tasaisen virtauksen lisäksi Auringosta lähtee erilaisia purkauksia jotka ovat tiheydeltään ja voimakkudeltaan suurempia kuin normaali aurinkotuuli.



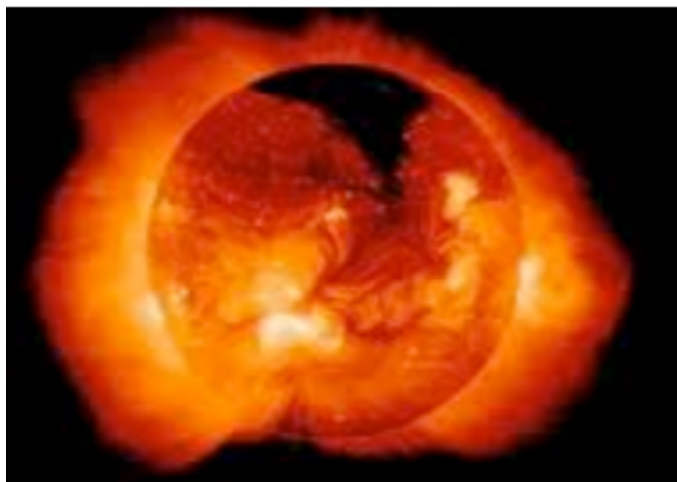
kuva 1:Auringon sisäinen rakenne nykykäsityksen mukaan. Kuvaan on merkitty eri kerrokset ja niissä etenevät helioseismiset aallot. Kuva ESA/Kari. A. Kuure.[1]

Aurinkotuuli leviää aurinkokuntaan ja sen ulkopuolelle heliosfääriin n. 120-130 Au:n etäisyydelle. Se koostuu pääosin protoneista ja elektroneista. Saapuessaan Maan radan etäisyydelle hiukkasvirran nopeus on keskimäärin $400 \frac{km}{s}$, tiheys $7 cm^{-3}$ ja magneettikentän voimakkuus 6 nT. Hiukkasten lämpötila on n. $10^5 K$ elektronien ollessa kuumempia kuin protonien. Syy

siihen miksi hiukkaset purkautuvat Auringosta on se, että koronana korkean lämpötilan aiheuttama paine voittaa Auringon gravitaatiovoiman. Tällöin plasman termien energia kiihdyttää hiukkaset supersoniseen nopeuteen ja lähettää ne avaruuteen. Tämän aiheuttama energia ei kuitenkaan todellisuudessa riitä voittamaan Auringon aiheuttamaa vetovoimaa. Siksi on ehdotettu, että magneettikentän rekonnektio antaisi hiukkasille niiden kaipaaman puuttuvan energian. Aurinkotuulen nopeus ei ole vakio. Aurinkopilkkujen 11 vuotisen syklin laskevalla kaudella Auringosta lähtee nopeaa aurinkotuulta. Se on peräisin koronan aukoista joita esiintyy Auringon napa-alueilla joissa magneettikenttäviivat ovat avoimia. Tuulen nopeus on $700\text{--}800 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ja se on harvaa. Hidasta aurinkotuulta esiintyy Auringon aktiivisella ekvaattorilla. Siinä voimakas magneettikenttä estää aurinkotuulta pakenemasta, jolloin sen tiheys kasvaa mutta nopeus pienenee. Hitaan aurinkotuulen nopeus on $300\text{--}400 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Plasmalle asetettujen plasmaehtojen sekä plasman korkean johtavuuden takia se kykenee kuljettamaan mukanaan auringosta lähtöisin olevaa magneettikenttää. Yleensä sanotaan että se on ”jäätynyt” kiinni plasmaan. Kun plasman purkaukset kohdistuvat maapalloa kohti sen mukana tuoma magneettikenttä muokkaa Maan magnetosfääriä.

3 Koronan aukot

Muutoksen tasaiseen aurinkotuuleen aiheuttavat koronan aukot. Nämä Auringon napa-alueille syntyvät avointen kenttäviivojen alueet lähettävät harvaa ja nopeaa aurinkotuulta. Tämä johtuu siitä, että plasma ei ole kiinni magneettikentän silmukoissa, jolloin hiukkaset pääsevät kulkeutumaan aurinkotuulen mukana avaruuteen. Auringon ollessa aktiivisimmillaan lyhytikäisiä aukkoja voi syntyä myös ekvaattorille. Koronan aukkoja kutsutaan myös heikon valon alueeksi, koska ne näkyvät tummina alueina koronakuvissa. Tämä johtuu siitä, että aukoissa plasman tiheys on pienempi kuin ympäröivissä alueissa. Alueet nähdään esimerkiksi Auringon röntgensäteilyn (kuva 2) ja ultraviolettisäteilyn havainnoissa.



Kuva 2: Röntgenaallonpituuksilla otettu kuva Auringosta elokuussa 1992 Yohkoh-satelliitin mittaamana. Napojen koronan aukot erottuvat tummina[2].

Koronan aukkojen kuvaamisessa käytetään hyväksi niistä lähtevän säteilyn spektriä. Napa-alueilla aukkoja voi esiintyä 7 vuoden ajan, jolloin nopean aurinkotuulen määrä on runsasta .

4 Auringonpilkut

Koronan aukkojen lisäksi aurinkotuuleen vaikuttavat Auringon pinnalle muodostuneet auringonpilkut. Nämä Maasta käsin nähdyt tummat alueet syntyvät, kun Auringon magneettikettä läpäisee Auringon pinnan jolloin lämmön virtaus Auringon pinnan alta pilkun alueelle häiriintyy. Pilkku jää ympäristöönsä kylmemmäksi minkä takia se näyttäytyy tummana läikkänä ympäristöönsä nähden. Auringonpilkuilla on 11-vuoden jaksollinen vaihtelu ja pilkkumaksimin aikaan Aurinko on aktiivisimmillaan. Pilkkujen keskikohtaa kutsutaan umbraksi ja niitä ympäröivää vaaleampaa aluetta penumbraksi. Penumbrat ovat koostumukseltaan juovikkaita mikä selittyy sillä että kuuma plasma pääsee virtaamaan niiden alueelta kohti pilkun keskiosaa. Kun pilkkujen kiertyneet magneettikentät lopulta purkautuvat avaruuteen ne synnyttävät erilaisia massapurkauksia.

5 Koronan massapurkaukset(CME)

Auringon uloimassa osassa tapahtuvat koronan massapurkaukset (coronal mass ejection, CME) saavat alkunsa kun alempaa fotosfääristä ja

kromosfääristä nousee ainetta koronaan. Tällaisessa purkauksessa olevat hiukkaset omaavat paljon suuremman energian ja magneettikentän kuin normaalissa aurinkotuulella olevat hiukkaset minkä takia ne aiheuttavat yleensä voimakkaita magneettisia myrskyjä osuessaan Maan magneettikenttään. Koronan massapurkauksessa auringonpilkkujen kierteiset magneettiketät tulevat hyvin epästabiileiksi jolloin ne purkautuvat avaruuteen. Ne kuljettavat mukanaan suuren määrän plasmaa. Tässä lähtevät hiukkaset kiihdytetään aurinkotuulella massapurkauksen edetessä. Samalla purkauksen eteen voi syntyä shokkirintama joka kiihdyttää osan hiukkasista hyvin korkeisiin energiatiloihin. Richard B. Horne työtovereineen on tutkinut näiden hiukkasten ennustamista ja mallintamista artikkelissaan Forecasting the Earth's radiation belts and modelling solar energetic particle events: Recent results from SPACECAST [3]. Tutkimuksessa todettiin, että suurienergiset hiukkaset ovat vaarallisia satelliiteille sillä ne kykenevät aiheuttamaan satelliiteissa toimintahäiriöitä sekä rikomaan niiden sensorit. Massapurkaukset ovat iältään hyvin lyhyt kestoisia ja siksi niiden ennustaminen on hyvin vaikeaa. Tämän takia koronan massapurkauksia pyritään seuraamaan mahdollisimman tarkasti.

6 Fläarit

Toinen Auringosta lähtösin oleva purkaus on nimeltään soihdumpurkaus eli flääri. Toisin kuin koronan massapurkauksissa flääreissä ei purkaudu hiukkasia vaan säteilyä kuten gamma-, röntgen ja UV-säteilyä. Ne ovat paljon voimakkaampia kuin koronan massapurkaukset, mutta kestävät muutaman tunnin ajan. Fläarit syntyvät kun auringonpilkun kiertynyt magneettisilmukka purkaantuu ja leviää avaruuteen. Koska fläarin syntymä ja purkaus kestää vain vähän aikaa niiden ennustaminen on hyvin vaikeaa. Tämä aiheuttaa vaaratilanteita astronauteille ja heidän laitteilleen. Vaikka koronan massapurkaukset ja fläarit tapahtuvat kumpikin aurinkopilkkujen aikaan niiden välille ei olla vielä löydetty aivan selvää yhteyttä. Flääri voi tapahtua ennen CME:tä sen aikana tai sen jälkeen.

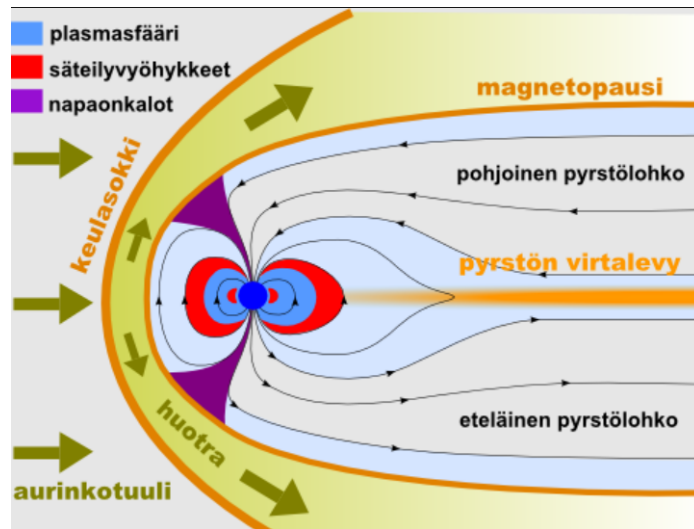
7 Magnetosfääri

Aurinkotuulen saapuessa maapallolle se osuu Maan sisäiseen magneettikenttään jolloin muodostuu magnetosfääri. Magnetosfääri on Maan magneettikenttä joka on muotoutunut komeettamaiseen muotoonsa aurinkotuulen siihen aiheuttamien sähkövirtojen takia (kuva 3). Se on

painunut kasaan päiväpuolelta ja venynyt pitkäksi hännäksi yöpuolelle. Kun aurinkotuulen hiukkaset osuvat magnetosfääriin magneettikenttään ne kokevat magneettikentän aiheuttaman voiman, joka hidastaa niitä. Tilannetta voidaan tarkastella aurinkotuulen dynaamisen paineen ja Maan magnetosfääriin aiheuttaman paineen avulla. Tasapainotilassa nämä paineet ovat yhtä suuret siten, että

$$K\rho_{SW}v_{SW}^2\cos^2\psi = \frac{B_{MS}^2}{2\mu_0}, \quad (1)$$

missä K on vakio jonka suuruus elastisille törmäyksille on $K = 2$ ja epäelastisille törmäyksille $K = 1$. Maapallon tilanteessa se saa arvon $K = 0.9$ mikä johtuu siitä, että aurinkotuulen hiukkaset kiertävät magnetosfääriä ympäri eivätkä siksi luovuta kaikkea liikemääräänsä magnetosfääriin. Aurinkotuulen dynaamisen paineen osuus on $\rho_{SW}v_{SW}^2\cos^2\psi$, missä ρ on aurinkotuulen tiheys, v_{SW}^2 on aurinkotuulen nopeuden neliö ja kulma ψ on aurinkotuulen ja maan magnetosfääriin normaalin välinen kulma. Yhtälössä B_{MS} kuvaa magnetosfääriin magneettikentän suuruutta ja μ_0 on tyhjiön permittivisyys. Todellisuudessa aurinkotuulen ja maan magneettikentän välistä tasapainoa ei voida laskea näin helposti. Ennenkuin hiukkaset pääsevät törmäämään magnetosfääriin ne osuvat magnetosfääriin eteen muodostuvaan shokkirintamaan ja magnetopausiin eli magneettikentän uloimpaan osaan. Nämä alueet muuttavat hiukan hiukkasten kulkusuuntaa. Tästä huolimatta edellä mainittu yhtälö on hyvä aproksimaatio yksinkertaisille laskuille.



Kuva 3: Magnetosfäärin halkileikkaus. Pohjoinen on ylhäällä ja Aurinko vasemmalla. Mustat viivat ovat Maan magnetosfäärin kenttäviivoja. Pyrstö jatkuu oikealle kauas kuvan ulkopuolelle. Kuva: Tiera Laitinen[4]

Aurinkotuulen elektronien ja protonien osuessa magnetosfääriin ne aiheuttavat sen pinnalle ns. magnetopausille virran. Kun hiukkaset tulevat magnetopausille Maan magneettikenttä aiheuttaa niihin Lorenz-voiman joka asettaa ne ympyräradalle. Protonien ja elektronien radat kaartuvat eri suuntiin jolloin varauksien erottumisesta syntyy magnetopausivirta. Magnetosfäärin kenttäviivat lähestyvät toisiaan Maan napa-alueilla napaonkaloissa jonne muodostuu magneettiset neutraalipisteet, joiden ympärillä magneettikenttä on hyvin heikko ja sallii aurinkotuulen plasman osittain tunkeutua magnetosfäärin sisälle.

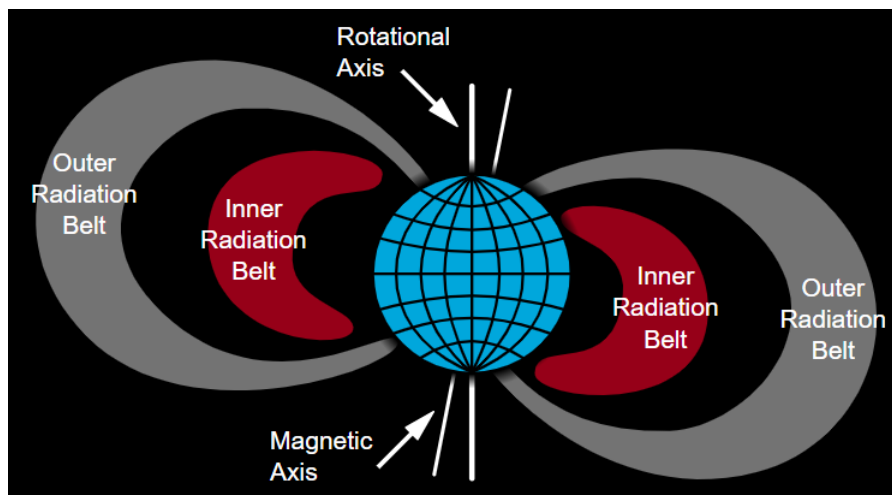
8 Magnetosfäärin aktiivisuus

Varsinkin silloin, kun aurinkotuulen magneettikenttä osoittaa etelään, eli se on vastakkainen Maan magneettikenttään nähden, se vaikuttaa voimakkaasti magnetosfäärin kiertoliikkeeseen. Tämä johtuu siitä, että aurinkotuulen ja magnetosfäärin vastakkaiset magneettikentät sulautuvat yhteen eli irtonaisesta aurinkotuulen kenttäviivasta ja suljetusta silmukasta muodostuvasta päiväpuolen magnetosfäärin kenttäviivasta syntyy kaksi toisesta päästä Maahan kytkeytyvää kenttäviivaa jotka läpäisevät magnetopausin. Tällaisista yhtymäkohdista pääsee virtaamaan runsaasti plasmaa magnetosfääriin.

8.1 Rengasvirta ja säteilyvyöt

Rekonnektion takia Maan magnetosfäärin kenttäviivat ovat avoimet Maan napa-alueilla. Nyt kun aurinkotuuli virtaa magnetosfäärin ohi, Maan kenttäviivojen päät jäävät aurinkotuuleen. Näin plasma pääsee kulkeutumaan ionosfäärin napakalottien poikki magnetosfäärin yöpuolelle. Yöpuolelle kulkeutuva plasma raahaa mukanaan myös päiväpuolella rekonnektiossa avattua magneettivuota, joka kasautuu magnetosfäärin pyrstöön. Jossain vaiheessa pyrstö ei pysty enää ylläpitämään suurentunutta magneettivuota, vaan tulee epävakaaksi. Magnetosfäärin pyrstö on jakautunut kahteen puoliskoon eli pyrstölohkoon, joissa on vastakkaiset magneettikentät, eli pohjoisessa kenttäviivat kulkevat kohti Maata ja etelässä Maasta poispäin. Näiden keskellä on virtalevy. Plasman päästessä yöpuolelle se kulkeutuu virtalevyyn, jolloin noin 100 Maan säteen etäisyydellä tapahtuu toinen magneettinen rekonnektio, jossa avoimet pyrstölohkojen kenttäviivat sulkeutuvat ja osa magnetosfäärin plasmasta sekä sulkeutuneesta magneettivuosta kulkeutuu takaisin päiväpuolelle. Samalla aikaa pyrstöstä kulkeutuu hiukkasia sisempään magnetosfääriin ja

matkallaan ne kiihtyvät suuriin energioihin [5]. Tämän lisäksi erityisesti voimakkaiden myrskyjen aikaan varautuneita hiukkasia pääsee kulkeutumaan ionosfääristä ylös suoraan magnetosfääriin. Kulkeutumisesta saamansa energian lisäksi etenkin elektronit kiihtyvät hyvinkin suuriin energioihin erilaisten sähkömagneettisten aaltojen vaikutuksesta. Näin Maan kenttäviivoille jää vangiksi suurienergiä hiukkasia, jotka muodostavat toroidin muotoisten Van Allenin vyöhykkeiden ulomman säteilyvyön, joka sijaitsee 10000-65000 km päässä Maan pinnasta. Ulompi vyöhyke koostuu pääosin elektroneista joiden energia on n. 100-10000 keV. Sisempi vyöhyke sijoitsee n. 1000-6000 km päässä Maan pinnasta. Se koostuu pääosin protoneista joiden energia on jopa 100 MeV. Sisempi vyöhyke muodostuu, kun kosmiset säteet pommittavat ilmakehää jolloin syntyy korkeaenergiä vapaita neutroneita. Kun neutronit sitten hajoavat syntyy protoneja jotka jäävät vangiksi Maan magneettikenttään ja näin syntyy sisempi säteilyvyö.



Kuva 4: Van Allenin vyöhykkeet[6]

Vyöhykkeillä olevat protonit ja elektronit ajautuvat epähomogeenisen magneettikentän vaikutuksesta Maan ympäri eri suuntiin siten että protonit kulkevat länteen ja elektronit itään. Näin syntyy sähkövirta, jonka suunta on länteen eli pohjoisesta katsottuna myötäpäivään. Tätä virtaa kutsutaan rengasvirraksi. Sen voimakkuutta voidaan mitata DST (Disturbance Storm Time) indeksin avulla. Sen arvon voimakas tippuminen kertoo magneettisen myrskyn alkuketken. Pudotus ei todellisuudessa ole kovinkaan suuri, vain muutamia satoja nanotesloja, mikä on vain noin prosentti Maan magneettikentän normaalista arvosta. DST on tuntiskaalan indeksi. Magneettisen myrskyn alkuvaiheen lisäksi DST indeksistä nähdään myrskyn

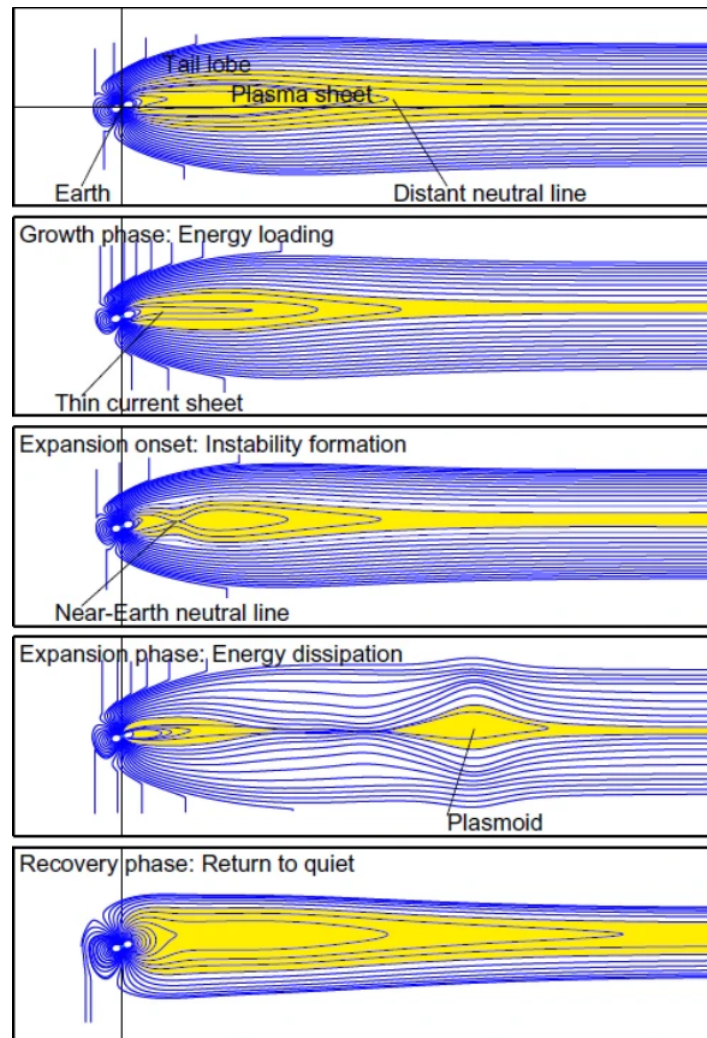
päävaihe ja palautumisvaihe. Karkeasti ottaen DST indeksi lasketaan keskiarvona neljän matalilla leveysasteilla olevan aseman mittaamasta Maan pinnan suuntaisen magneettikenttäkomponentin poikkeamasta nollatasoon nähden. Reaaliaikainen indeksi löytyy WDC sivuilta [7].

8.2 Myrskyt ja alimyrskyt

Aurinkotuulen ja magnetosfäärin välisen rekonnektion voimistuessa magnetosfäärissä tapahtuu monenlaisia häiriöitä, joista yleisimmät ovat ns. alimyrskyt ja magneettiset myrskyt. Yleensä ne ovat harmittomia, mutta pahimmassa tapauksessa ne voivat aiheuttaa yhteiskunnallisia ongelmia. Näistä kerrotaan myöhemmin. Näihin liittyvä näkyvin ilmiö ovat revontulet, jotka syntyvät ionosfääriin avaruudesta tulevista hiukkasista. Alimyrskyt ovat pyrstön yöpuolella tapahtuvia ilmiöitä ja magneettiset myrskyt ovat globaaleja koko Magnetosfäärin alueella tapahtuvia häiriöitä, joille on tyypillistä rengasvirran ja säteilyvöiden voimistuminen.

8.3 Revontulet

Revontulet syntyvät kun aurinkotuulen hiukkaset osuvat magnetosfääriin ja kulkeutuvat sen pyrstöosaan. Pyrstön keskellä oleva virtalevy tulee epästabiiliksi sinne virtaavan magneettivuon ja plasman takia ja lopulta se katkeaa. Tällöin virta sen poikki katkeaa ja hetkellisesti sulkeutuu ionosfääriin läpi magneettikentän suuntaisina virtoina. Samalla osa pyrstön magneettivuosta pääsee karkaamaan aurinkotuuleen. Kun purkaus on ohi pyrstö palaa takaisin normaalitilaan.



kuva 5: Magnetosfäärin pyrstön vaiheet. [8].Pulkkinen, T. Space Weather: Terrestrial Perspective. Living Rev. Sol. Phys. 4, 1 (2007).
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2007-1>

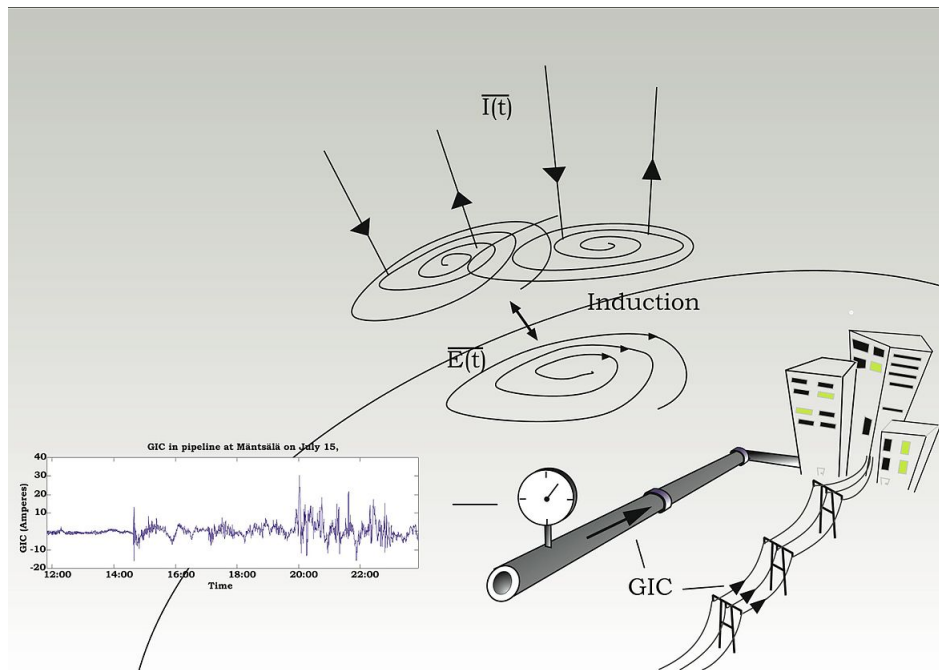
Ionosfääristä magnetosfääriin virtaa kuljettavat elektronit törmäävät ionosfäärin atomeihin ja virittävät ne korkeammille energiatiloille. Viritystilan purkautuessa atomit säteilevät fotoneja eli valoa joka nähdään revontulina. Purkauksessa syntyvän valon väri riippuu virittyneestä hiukkasesta ja törmäyksen energian suuruudesta. Ionosfäärissä on suurimmaksi osaksi happiatomeja joiden viritystilojen purkaukset säteilevät vihreää ja punaista valoa. Tämän takia yötaivaalla nähtävät revontulet ovat yleensä vihreänpunaisia. Ionosfäärissä on myös runsaasti typpimolekyylejä joiden viritystilat säteilevät sinistä väriä. Revontulia nähdään yleensä 60-75 asteen leveysasteilla.

9 Yhteiskunnallisia vaikutuksia

Magneettiset myrskyt aiheuttavat useita erilaisia ilmiöitä, jotka vaikuttavat yhteiskuntaan. Näitä ovat esimerkiksi geomagneettisesti indusoituneet virrat Maan pinnalle ja plasma-aukot ionosfäärissä. Nämä voivat aiheuttaa sähköverkkojen muuntajien vaurioitumista sekä GPS- ja radiosignaalien häiriöitä. Avaruussään ilmiöt eivät kuitenkaan ole kokonaan haitallisia vaan esimerkiksi revontulista voi olla taloudellista hyötyä. Tutustutaan seuraavaksi mainittuihin ilmiöihin tarkemmin.

9.1 Geomagneettisesti indusoituneet virrat

Samalla kun magnetosfäärin kentänsuuntaiset virrat sulkeutuvat ionosfäärin läpi ne aiheuttavat neutraalien hiukkasten ionisaatiota, mikä lisää ennestään ionosfäärin sähkönjohtavuutta jolloin sähkövirtojen virtaus helpottuu. Ionosfäärissä kulkevien virtojen muuttuessa ne indusoivat muuttuvan magneetikentän, joka aiheuttaa maapallon pinnalle geomagneettisesti indusoituneita virtoja. Tämä perustuu Faradayn lakiin, jonka mukaan muuntuva magneettivuo synnyttää sähkömotorisen voiman [9]. Nämä virrat kulkevat mahdollisimman pieniresistanssisissa rakennelmissa kuten maakaasuputkissa, öljyputkissa ja sähköverkossa. Erityisesti silloin kun geomagneettinen myrsky on voimakas voi sähköjohtoihin indusoitunut virta aiheuttaa maanlaajuista tuhoa. Verkossa kulkeva virta on vaihtovirtaa mutta geomagneettisesti indusoitunut virta on vaihtovirtataajuuksiin verrattuna lähes tasavirtaa. Tällainen virta voi tuhota muuntajia lämmittämällä niitä ja aiheuttaa niiden kyllästymisen. Eniten geomagneettisesti indusoituneita virtoja esiintyy revontulialueiden läheisyydessä, minkä takia esimerkiksi Suomessa sähköverkot suojataan käyttämällä erilaisia tasasähköisiä komponentteja, kuten DC-sivusuodattimia, -inverttereitä ja -johtoja. Eräitä geomagneettisten myrskyjen aiheuttamia vakavia tapahtumia ovat: maaliskuussa 1989 Kanadan Quebecissa aiheutunut sähköverkon romahdus sekä vuoden 2003 Halloween myrsky.



kuva 6: Geomagneettisesti indusoituneen virran (GIC) syntyperiaate. Ionosfäärin sähkövirrat synnyttävät muuttuvan magneettikentän. Magneettikenttä indusoi sähkökentän $E(t)$, joka saa aikaan GIC-virtoja maanpinnalla [10].

Maaliskuun 13-14. 1989 koettiin poikkeuksellisen voimakkaita peräkkäisiä koronan massapurkauksia. Ne aiheuttivat koko Maan lähiavaruudessa ja Maan pinnalla ongelmia, mutta suurin vaikutus kohdistui Kanadaan. Siellä koettiin jopa 9 tunnin sähkökatkos. Magneettisen myrskyn aiheuttama virta rikkoi kanadalaisten verkon kompensattorin mikä johti jännitteen putoamiseen jolloin taajuus kasvoi ja lopulta verkko kaatui. Tämän lisäksi havaittiin hyvin voimakkaita revontulia jopa Kuubassa asti.

Lokakuun 30. 2003 tapahtuneessa Halloween myrskyssä nähtiin niin ikään voimistuneita revontulia jopa Yhdysvaltain Floridan osavaltiossa asti. Tällöinkin koettiin sähkökatkoksia esimerkiksi Ruotsissa, mutta sähköverkoille Halloween myrsky ei ollut aivan yhtä tuhoisa kuin vuoden 1989 myrsky.

9.2 Radio- ja GPS-signaalit

Radio- ja GPS-signaalien etenemiseen ionosfäärissä vaikuttaa sen johtavuus. Kun magneettisten myrskyjen aikaan ionosfäärin johtavuus on

suuri eli elektronitiheys on korkea tietyt taajuudet voivat heijastua kokonaan ionosfääristä, jolloin signaali ei pääse satelliiteille. Päiväpuolella Auringosta purkautuvat fläarit nostavat ionosfäärin ionisaatiota ja yöpuolella ionisaatiota nostavat avaruudesta ilmakehään satavat varatut hiukkaset. Ionisaation voimistumisen lisäksi ionosfääriin yöpuolelle voi syntyä plasmakuplia. Ne syntyvät kun auringon säteilyn aiheuttama ionisaatio loppuu. Nämä erilaiset ionosfäärin häiriöt aiheuttavat radioaaltojen viivästymistä sekä GPS-signaalien häiriöitä.

9.3 Vaikutus satelliiteille

Korkeaenergiset hiukkaset Van Allenin vyöhykkeellä, aurinkotuulussa ja kosmisessa säteilyssä voivat vahingoittaa satelliitteja aiheuttaen niihin toimintahäiriöitä ja pahimmissa tapauksissa jopa rikkoo ne. 2000-luvulla satelliittien määrä on kasvanut koko ajan. Niitä käytetään yhä useampaan eri tarkoitukseen kuten viestintään, navigointiin, maapallon tarkkailuun sekä turvallisuuden ja puolustuksen ylläpitoon. Kulkiessaan radoillaan satelliitit kokevat monenlaisia muutoksia energisten hiukkasten johdosta. Kosminen säteily voi tunkeutua satelliittien sähköisten komponenttien läpi, jolloin ne aiheuttavat häiriöitä esim. muistipiireissä. Aurinkotuulen hiukkaset voivat vahingoittaa satelliittien puolijohdekomponenttien kidehiloja ja vaikuttaa siten esim. transistorien toimintaan. Nämä häiriöt voivat aiheuttaa virheitä satelliittien lähettämään informaatioon. Van Allenin vyöhykkeiden korkeaenergiset elektronit voivat synnyttää satelliitteihin sisäisiä varauksia jotka voivat johtaa sähköstaattisiin purkauksiin. Tällaiset purkaukset voivat rikkoo komponentteja ja eriste materiaaleja. Matalampienergiset hiukkaset voivat aiheuttaa varauksia satelliittien pinnoille. Yleisesti siis korkeaenergiset hiukkaset aiheuttavat satelliittien toimintakyvyn heikentymistä ja siten ne määrittävät omalta osaltaan satelliittien toimintaiän. Yleensä hiukkasten aiheuttamia vahinkoja voidaan kompensoida, mutta joskus ääritapauksissa kuten erittäin voimakkaan aurinkotuulen aikaan satelliitit voivat rikkoutua kokonaan. Esimerkkinä tällaisesta ääritapauksesta on edellä mainittu Halloween myrsky, jonka aikana raportoitiin 47 satelliitissa häiriöitä, 10 oli poissa toiminnasta yli 24 tuntia ja yksi melko keskeinen satelliitti (ADEOS) tuhoutui kokonaan. Satelliittien toimintaelinikää pyritään kokoajan pidentämään paremman suunnittelun avulla, mutta kaikkia hiukkasten aiheuttamia riskejä ja haittoja ei voida poistaa. Tämän takia avaruussään tutkimusta ja ennustamista kehitellään koko ajan, jotta satelliitteja voitaisiin suojella paremmin.

9.4 Vaikutus astronautteihin

Aurinkotuuli, auringon energettiset hiukkaspurskeet, kosminen säteily sekä Van Allenin säteilyvöiden hiukkaset lisäävät merkittävästi astronauttien saamaa säteilyannosta. Tämä on vakavaa, sillä säteily aiheuttaa syöpää ja geneettisiä vaurioita sekä hedelmättömyyttä. Siksi astronautit käyttävät säteilyltä suojaavaa pukua, joka ei päästä lävitseen normaalia säteilyä, ja välttävät avaruusaluksen ulkopuolella liikkumista. Tästä huolimatta astronautit joutuvat aina välillä hoitamaan avaruusaluksen ulkopuolisia tehtäviä. Voimakkaiden avaruusmyrskyjen aikaan hiukkasten energiat voivat kohota niin suuriksi että ne kykenevät läpäisemään jopa suojaupuvun. Tämän takia avaruusalusten sisällä on paksulla alumiinilla vuorattuja tiloja joihin astronautit voivat mennä suojaan kaikkein voimakkaimpien myrskyjen aikaan. Astronauttien suojaksi kehitellään kokoajan yhä parempia suojaupukuja sekä laitteita jotka kykenisivät hoitamaan aluksen ulkopuolella tehtäviä töitä.

9.5 Revontulimatkailu

Revontulet lisäävät kotimaan matkailua Pohjois-Suomeen, mutta suurin osa ns. revontulituristeista tulee ulkomailta. Erityisesti japanilaiset ovat kiinnostuneet revontulista. Niinsanottu revontulimatkailu on lisännyt suosiotaan viime vuosina huomattavasti ja revontulet ovat nousseet yhdeksi keskeisimmäksi syyksi ulkomailta tulevalle turismille Suomen metsän, lumen ja Joulupukin lisäksi. Talvella 2019-2020 Lapissa kirjattiin peräti 1,7 miljoonaa yöpymistä ja majoituksesta saadut tulot nousivat 128 miljoonaan euroon. Suurin matkailusesonki ajoittuu talvelle sillä kesällä revontulia on hankalampi nähdä kirkkaalta taivaalta. Lisääntyneen suosion takia majoituspaikkoja pyritään rakentamaan nopeasti ja tehokkaasti lisää [11]. Esimerkiksi Rovaniemelle on rakennettu 46 revontuli-iglua joissa turistit voivat yöpyä ja ihaila revontulia. Lisäksi siellä on telttoja ja mökkejä, joiden katot on valmistettu lasista tai muusta läpinäkyvästä aineesta. Turistien on mahdollista ladata puhelimiinsa sovellus, joka ilmoittaa milloin taivaalla voisi näkyä revontulia. Sovellus saa tietonsa rakennusten katoille rakennettujen sensorien avulla. Niitä sijaistaa Rovaniemellä, Ranualla, Pyhänturilla ja Luostolla.



kuva 7: Iglu-majoitus Sodankylässä [12]

Majoituksen lisäksi tuloja saadaan oheistuotteista kuten kaupoista, turisteille vedetyistä kierroksista, yms. Lisäksi Lappiin on lisätty lentoreittejä jotka helpottavat ja lisäävät sinne kohdistuvaa turismia.

10 Yhteenveto

Avaruussää vaikuttaa monelta osin maapalloon, minkä takia sen tutkiminen on tärkeää. Sen aiheuttamat ilmiöt voivat olla harmittomia tai jopa ihailtuja kuten revontulet tai yhteiskuntaa vaarantavia kuten geomagneettisesti indusoituneet virrat ja suurivarauksisten hiukkasten vaikutus satelliitteihin ja astronautteihin. Avaruussään tutkimista ja ennustamista kehitetään jatkuvasti, mutta se on vaikeaa häiriöiden arvaamattomuuden takia. Siksi nykyäänkin häiriöitä kyetään ennustamaan luotettavasti vain muutaman päivän päähän.

11 Lähteet

[1]

https://1.bp.blogspot.com/-CWHyCRXVW6Q/WYFjIXuH00I/AAAAAAAAAKKo/z_YyGIkUSKIWEx5JaYScM0YdCtN0SzC2ACLCBGAs/s1600/Auringon%2Brakenne.jpg
(viitattu 25.5.2021)

[2] https://moodle oulu.fi/pluginfile.php/293457/mod_label/intro/Luku2_Aurinko.pdf
(viitattu 22.5.2021)

[3] Richard B. Horne, Sarah A. Glauert, Nigel P. Meredith, Hannu Koskinen, Rami Vainio, Alexandr Afanasiev et al. Forecasting the Earth's radiation belts and modelling solar energetic particle events: Recent results from SPACECAST, J. Space Weather Space Clim.3,A20 (2013) (viitattu 3.3.2021)

[4] <https://www.ilmatieteentaitos.fi/magneettikeha>

[5] Mikko Marsch. Magneettisten myrskyjen ajajista. (2012) (viitattu 30.6.2021)

[6] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/02/Van_Allen_radiation_belt.svg/375px-Van_Allen_radiation_belt.svg.png

[7] http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/presentmonth/

[8] https://media.springernature.com/full/springer-static/image/art%3A10.12942%2Fflrsp-2007-1/MediaObjects/41116_2015_9173_Fig5.jpg?as=webp

[9] https://fi.wikipedia.org/wiki/Faradayn_induktiolaki

[10] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b5/GIC_generation.jpg/375px-GIC_generation.jpg

[11] Amanda Rantakoko. Majoitusrakennus revontulimatkailuun. (Toukokuu 2018) (viitattu 9.11.2021)

[12]

<https://www.visitsodankyla.fi/wp-content/uploads/igluvisitsodankyla.jpg>